

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-213680

(43) 公開日 平成8年(1996)8月20日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>  
H 0 1 S 3/098

識別記号

府内整理番号

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数25 FD 外国語出願 (全34頁)

(21) 出願番号 特願平7-296161  
(22) 出願日 平成7年(1995)10月18日  
(31) 優先権主張番号 08/326928  
(32) 優先日 1994年10月21日  
(33) 優先権主張国 米国(US)

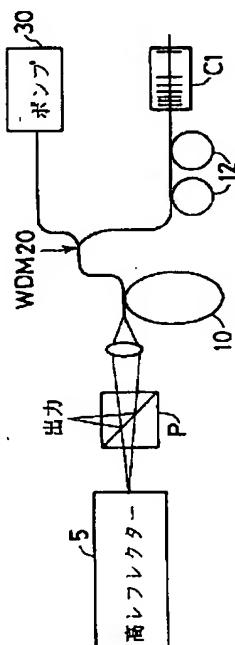
(71) 出願人 000000011  
アイシン精機株式会社  
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地  
(72) 発明者 マーチン・イー・ファーマン  
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン  
アーバー レイバイン・コート4931  
(72) 発明者 ドナルド・ジェイ・ハーター  
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン  
アーバー サルグレイブ・プレイス3535  
(74) 代理人 弁理士 大川 宏

(54) 【発明の名称】 モードロックレーザー装置

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、分散が高い光学要素を含むモードロックレーザー装置によって、高出力のレーザーパルスを発生させることを課題とする。

【解決手段】 分散光学要素は、レーザー発振器の内部の振動パルス幅を広げ、与えられた発振パルスエネルギーに対するレーザーキャビティの非線形性が減少する。その結果、出力パルスエネルギーが従来より1~3桁も増加している。例えば、分散要素としてチャーブ・ラグ格子C1をもつエルビウムファイバーレーザー10がある。さらに、カーモード同期技術を使用すれば、ファイバー・レーザーキャビティ内の非線形性が高く保たれて、ピコ秒のパルス幅で2nJまでのエネルギーを持つパルス列の生成が可能になる。また、チャーブ・ファイバーラグ格子の広い帯域幅と、レーザーの偏光制御および利得スペクトル制御とを使用すれば、10nmを越える波長チューニング範囲が得られる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】キャビティ内にエネルギーを増幅する利得媒体と、該利得媒体を通る一軸に沿ってエネルギーを反射する反射手段と、該キャビティ内で発生したレーザーエネルギーを出力する出力手段と、を含む前記キャビティの一部として、少なくとも一つのチャーブ格子を含む分散遅延線を備えているレーザーエネルギーを発生させるレーザーエネルギー発生手段を有するモードロックレーザー装置。

【請求項2】分散が同一または互いに異なっている複数のチャーブ格子が、分散遅延線要素として使用されている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項3】前記複数のチャーブ格子のうち少なくとも一つは、さらに前記反射手段としても作用する請求項2記載のモードロックレーザー装置。

【請求項4】前記キャビティ内に波長チューニングする光フィルターをも備えている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項5】キャビティ内損失および偏光状態を制御する制御手段を含む波長チューニング手段をも備えている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項6】前記格子の作動温度の変更または該格子の伸長により、該格子の反射率の変更を誘導する誘導手段を含む波長チューニング手段をも備えている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項7】前記格子の伸長により、該格子の反射率の変更を誘導する誘導手段を含む波長チューニング手段をも備えている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項8】前記チャーブ格子は、チャーブファイバーまたは導波路格子からなる請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項9】前記利得媒体は、利得物質でドーピングされている光ファイバーおよび光導波路のうちいずれか一つからなる請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項10】前記レーザーのモード同期は、自然起動のためにキャビティ撮動を誘起することによって起動される請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項11】モード同期レーザー発振の自然起動に使用する目的で、前記キャビティの内部または外部にカップリングされている飽和性吸収体をも含む請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項12】前記レーザーの主モード同期機構として、カーラー型のモード同期および飽和性吸収体のモード同期のうちいずれかと結合している受動モード同期が装備されている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項13】前記利得媒体は、チャーブ導波路格子からなる前記チャーブ格子とドーピングされた光ファイバ

ーとからなる請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項14】前記ファイバーの偏光固有モード間の線形位相ドリフトを除去するファラデー反射鏡と、ファイバーレーザーの偏光状態を制御するファイバー偏光制御器と、該レーザーの偏光固有モード間の線形位相遅れを制御する波板と、該ファイバーレーザーの単一偏光状態を選択するキャビティ内偏光子と、をも備えている請求項9記載のモードロックレーザー装置。

【請求項15】ファイバー内の非線形偏光旋回が、主モード同期機構として使われている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項16】前記ファイバー内の非線形偏光旋回が、主モード同期機構として使われている請求項14記載のモードロックレーザー装置。

【請求項17】前記受動モード同期技術には、非線形偏光旋回が利用されている請求項12記載のモードロックレーザー装置。

【請求項18】力学的な撮動に対するレーザー性能の感度を最小限に抑える目的で、少なくとも一つの偏光維持ファイバーが前記キャビティ内に含まれている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項19】力学的な撮動に対するレーザー性能の感度を最小限に抑える目的で、少なくとも一つの偏光維持ファイバーが前記キャビティ内に含まれている請求項14記載のモードロックレーザー装置。

【請求項20】同時に複数の波長でモード同期を得ることを目的として、キャビティ内損失および偏光状態を制御する複数の波長チューニング手段をも備えている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項21】前記レーザー装置は、複数の偏光制御器をもつモード同期フィギュア・エイト（8の字型）レーザー装置である請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項22】能動モード同期手段が使用され、外部タイミング信号源とカップリングされている請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項23】前記能動モード同期手段は、電気光学変調器および音響光学変調器のうちいずれかである請求項22記載のモードロックレーザー装置。

【請求項24】前記キャビティ内に一对のチャーブ格子が配置されており、二つの波長で同時に前記レーザー装置のモード同期作動を起こす目的で、該格子はそれぞれ分離している反射特性を有する請求項1記載のモードロックレーザー装置。

【請求項25】前記利得媒体は、モード同期を最適化する目的で、前記キャビティ内に配置されている不可逆線形位相シフターにカップリングされている請求項21

記載のモードロックレーザー装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明のモードロックレーザー装置は、振動パルス幅の分散制御により光パルスを生成するモードロックレーザー装置に関し、モードロックレーザーの技術分野に属する。多くの光技術分野において、ピコ秒オーダーの光パルスを発生する小型のチューナブル（波長可変）レーザー源が必要とされている。理想を言えば、そのパルス幅は各種フォトデテクター（光検出器）の検出限界、すなわち現在の技術では1～5 ps程度であることが望ましい。希土類ドーピングを施されているファイバーによる単モードのレーザー装置は、このようなレーザー源の有力な候補である。これは、容積および必要なポンプパワーが小さいという上記レーザー装置固有の性質によるもので、プールらの文献（S.B. Poole, D.N. Payne and M.E. Fermann, Electron. Lett., 21, 737 (1985)）に開示されている。

【0002】本発明の目的は、上記レーザー装置からパルス幅の分散制御により高出力の光パルスの発生を達成することである。

【0003】

【従来の技術】1 nJ 近いエネルギーの100 fs より短いパルスを生成する能力がある小型のバッシブ・モードロック（受動モード同期）ファイバー・レーザーは、今や周知であり、ファーマンらの文献（M.E. Fermann, M. Haberl, A.J. Schmidt and L. Turi, Opt. Lett., 16, 244 (1991)）に開示されている。しかしながら、パルス幅がピコ秒レベルに増加すると、パルスエネルギーは減少し、通常ほんの20～30 pJ になってしまう。この減少は、各種レーザー装置の代表的な設計に課せられた安定性の要求に起因する制限によるところが大きい。

【0004】例えば、帯域幅の限定されたピコ秒パルスは、アクティブ・モードロック（能動モード同期）ファイバー・レーザー装置により容易に発生することができる。しかし、レーザーの安定性を保つ上で、キャビティの非線形性が低く保たれる（例えばキャビティの長さに比べてソリトンの周期が長いまま残る）ことが要求される。この目的で、非線形位相遅れが0.1 π [rad] 未満であることが保証されるべきであり、これについてはケリーらの文献（S.M.J. Kelly, K. Smith, K.J. Blow and N.J. Doran, in Opt. Lett., 16, 1337 (1991)）に開示されている。標準的な積分変調器により導入される大きなキャビティ内部損失と、通常採用される高い反復率とに関連して、これ（非線形位相遅れの微小化要求）は発生したパルスパワー（出力）の微弱化を招いている。

【0005】一方、在來のバッシブ・モードロック・ファイバーレーザー装置では、大量の負の分散（ソリトン支持分散）をキャビティ内部に設けることにより、ビ

コ秒パルスを発生させることができる。これは、長い（100 mを越える）光ファイバーをキャビティ内に設けることにより実現でき、タバーナーらの文献（D.T. Berner, D.J. Richardson and D.N. Payne, in Opt. Soc. Am. Topical Meeting on Nonlinear Guided Wave Phenomena, Cambridge, 1993, Opt. Soc. Am. Techn. Dig. Series, 15, 367 (1993)）に開示されている。その結果、上記キャビティには大きな非線形性が生じ、この非線形性により、明らかに生成可能なパルスエネルギーが制限されている。さらに、長いファイバーを採用しているので、このような長いレーザー装置の安定性は低下している。

【0006】最近では、飽和性吸収体（サチュラブル・アブゾーバー）を備えたバッシブモードロック・ファイバーレーザー装置により、帯域幅が限定された大出力のピコ秒パルス（2 nJ, 5 ps）が得られている。これについてはバーネットらの文献（Barnett et al., in Opt. Soc. Am. Techn. Dig. Ser., 8, 52 (1994)）に開示されており、ここでも参照する。しかしながら、Qスイッチングに対するエルビウム・ファイバーレーザーの影響され易さと、代表的な飽和性吸収体の材料のもつ低い破損閾値（ダメージ・スレッショルド）とによる上記装置（システム）の長期信頼性については、今日に至るもなお疑問視されている。そのうえ、モードロックのために採用されている非線形性のもつ共振性のゆえ、かような装置では、ごく限られた波長可変能力（チューナビリティ）しか得られないのに、飽和性吸収体とレーザー利得媒体との間に極めて高度の調和が要求される。同様に、かようなレーザー装置には単純な縮尺法則（スケーリング・ロー=他の寸法に当てはめる為の法則性）が存在しないので、レーザー装置の設計は困難を極め、与えられた仕様にレーザー装置の性能を適合させるのが大変である。

【0007】低出力のピコ秒パルスは、ファイバー・レーザーキャビティ内に非チャーブのファイバーブラッギング格子を組み込むことによっても得られており、このことはノスケらの文献（D.U. Noske et al., Optics Communications 108 (1994) 297-301）に開示されている。しかしながら、かような格子では分散の分布（dispersion profile）が一様ではないので、得られるパルスは、帯域幅が限定されていないものが代表的であり、ごく限定された波長可変レンジを有するに過ぎない。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】従来技術の持つ上記問題点に鑑み、本発明は、高出力の光パルスを生成することが可能な、単モードのファイバー・モードロックレーザー装置を提供することを解決すべき課題とする。

【0009】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】発明者らは、キャビティ内で大きな負の分散を生じる高

分散能の光要素を用いてカーモードロック・レーザーのパルス幅を制御することにより、近帯域に限定された高出力のピコ秒パルスを生成する小型の高出力レーザー源を発明した。ある実施例では、レーザー源はエルビウム・ファイバー・レーザーであるが、他のファイバー・レーザー利得物質や、他の導波路レーザー装置またはバルク固体レーザー装置ないし半導体レーザー装置と同様の作用を、この装置（システム）は有する。また、ある実施例では、チャーブ・ファイバー格子が分散要素として使用されているが、他のいかなる種類の導波路中のチャーブ格子でも適用可能である。同様に、一対のバルク格子により大きな負の分散を生成することも可能である。それでも、小型に設計するという観点から、分散要素としてはファイバーや導波路を用いることが望ましい。

【0010】本発明は、キャビティの非線形性が近似的に一定に（典型は非線形性位相遅れがπ付近に）保たれることを保証するために、ファイバー・レーザー装置によるカーモードロック技術を使用している。本発明によれば、在来のモードロック・ファイバー・レーザーと比較して、パルスの出力エネルギーを飛躍的に増大させることができる。本発明のレーザー装置（システム）は、1nJを越えるエネルギーを含む3psのパルス（パルス列）を発生させている。チャーブ・ファイバー格子の広い帯域特性により、12nmないしそれ以上の波長可変レンジが得られる。

#### 【0011】

【発明の実施の形態】本発明のモードロックレーザー装置の一般的な模式図を、図1に示す。ファイバー格子1には、1.555μmの波長を中心に13nmの帯域幅を持つチャーブが施されており、その最大反射率は100%に近い。チャーブ・ファイバー格子については現在の技術水準で本質的に理解されており、スーデンらの文献（K.Sugden and I.Bennion, A.Molony and N.J.Copper, in Electron lett., 30, 440(1994)）に開示されている。同文献は、ここでも参照している。

【0012】ファイバー格子1の格子長はおよそ5mmであり、その群速度の分散（GVD）は波長1.580μmで $3.40 \pm 0.05 \text{ ps}^2$ であると、単純なパルス圧縮技術による計測で求められている。アクティブ・ファイバー10は、0.02モル%のEr<sup>3+</sup>ドーピングが施されており、その開口数は0.16nm、そのカットオフは1140nm、これに対応する強度のスポット半径は2.6μmである。アクティブ・ファイバー10の長さは2mであるが、このレーザー・キャビティ内で使用するには、通常の電話線ファイバーで同ファイバーのリード部分にさらに1.6mが必要である。このファイバー・レーザーは、波長980nmで作動する主発振器強度增幅器（MOPA）レーザー・ダイオード30から供給される400mWに上る発射出力を得て、波

長分離多重カップラーWDM20を介してポンピング（励起）される。

【0013】ファブリ・ペロー型の装置は、非線形偏光旋回（NPE）がモード同期技術として好ましいと示唆している。同技術の詳細については、ここでも参照しているがホーファーらの文献（M.Hofer, M.E.Fermann, F.Haberl, M.H.Ober and A.J.Schmidt, Opt.Lett., 16, 502(1991)）を参照されたい。キャビティ内の偏光子Pは、高レフレクター5およびアクティブ・ファイバー10にカップリングされており、同キャビティ内で単一の偏光を選択するのに使われている。そして、ファイバー・レーザー内の偏光状態は、従来のファイバー・ループ制御器12によって最適化されている。偏光子Pもまた調整可能な出力カップラーとして装備されている。

【0014】NPEモード同期は、通常、自然に同期し始めるわけではないから、移動反射鏡の技術によってモード同期を始めさせる。モード同期のヒステリシスを特に要さず、240mW程度の発射出力で固定反復率27MHzの単パルス作動が一貫して得られる。始動状態の再現性は高く、その始動状態の下では極めて狭い連続波の放射が帯域幅0.1mm未満で得られる。この連続波放射の初期のピート音（ピート・ノート）の電波帯域幅は1kHz未満であり、このことはキャビティ内側での偽反射が低水準にあることを示している。この詳細については、例えばクラウスらの文献（F.Krausz, T.Brabec and C.Spielmann, Opt.Lett., 16, 235(1991)）やハウスらの文献（H.A.Haus and E.P.Ippen, Opt.Lett., 16, 1331(1991)）等を参照されたい。チャーブ格子がレーザー・キャビティ内に挿入されているので、固定的なキャビティ長が不足し、空間的なホールバーニング（レーザー発振の周辺での利得低下現象）は低減されている。この低減効果は、パルス始動のために本当に好ましいものと考えられている。ここでも参照しているが、一般にはクラウスらの文献（F.Krausz and T.Brabec, Opt.Lett., 18, 888(1993)）を参照されたい。

【0015】典型的な自己相関性のトレースと、（波長）1.551μmでの（出力）1.1nJのパルスに對応するスペクトルとを図2（a）および図2（b）に示す。（パルス波形を）sech<sup>2</sup>型と仮定して、最大値の半分のパルス幅は2.7psであった。また、對応する時間と帯域幅との積は、0.40と算定されており、ソリトンパルスのための周波数帯の制限値である0.31に近い。ポンプパワーを増加させることによって、2nJまでのパルスエネルギーが得られるものの、その結果、キャビティの非線形性が大きくなるので、エネルギーの大半は低レベルの基礎部分に吸収されて失われている。格子の反射率カットオフのせいで、図2（b）に示すように、スペクトルのサイドバンドは、この特定のパルススペクトルの赤色側でのみ発生した。第1サイドバンドのピークは同図からはみ出しているが、

密度にして 5. 0 である。

【0016】レーザーの偏光状態とキャビティ内の偏光子での損失を調整すれば、モードロック（モード同期された）波長をチューニングすることができる。ここで、キャビティ内損失の変動は、1. 5  $\mu\text{m}$ でのレイジングに対するエルビウムの遷移応答性の準4レベル特性に従って、そのエルビウムレーザーの有効利得スペクトルをも変化させる。それゆえ、キャビティ内の高損失および短い有効ファイバー長には、最高利得の横断面（クロスセクション）を与える波長（1. 535  $\mu\text{m}$  および 1. 550  $\mu\text{m}$ ）でのレーザー放射が望ましい。これらの波長では、キャビティ内の低損失および長い有効ファイバー長には、もっと長い波長でのレーザー放射が適当である。典型的な例を挙げれば、ファイバー内の偏光状態の波長依存性のせいで、最適モードロック（モード同期）作動を得るために、放射波長のそれについて（=各放射波長毎に）偏光制御器の再調整が必要である。波長チューニングにおける偏光制御の要求は、キャビティ内の低効率複屈折および低効率複屈折チャーブファイバー格子を使用することにより、最小に抑えることができる。

【0017】現在のレーザーシステムの最大チューニングレンジは、1. 550  $\mu\text{m}$  から 1. 562  $\mu\text{m}$  までであり、図3中に黒い正方形で示すように、主として格子の反射率の帯域幅によって制限されている。幅が 2. 7 ~ 3. 7  $\text{ps}$  で、バンド幅が制限されている  $\text{sech}^2$  形状に近いパルスが得られている。測定されたパルス幅（黒丸）と、時間と帯域幅との積とを図3に示す。ここで、連続的なチューニングが不可能であったことに注意されたい。この現象は、むしろ、お互いに 2 nm 程度ずつ離れている離散波長の特定の組み合わせでレーザー放射が起きているものとして捉えられていた。これは、再び図3に示すように、同一周期に対する格子の反射率の小さな不揃いに起因するものと考えられる。したがって、反射率を平滑化する機能をもつチャーブファイバー格子を採用すれば、より平滑な波長チューニングが得られる。300 mW のポンプパワーで生じた出力のパルスエネルギーは、出力カップリング効率の 9.3% から 3.5% までの変化による波長の増加にともなって、11 nJ から 0.4 nJ の範囲で変化する。

【0018】出力 1. 1 nJ のパルスでは、キャビティ内の平均非線形位相遅れはおよそ  $\pi$  であり、この値は複数の典型的なエルビウムソリトンレーザーで一定である旨、ファーマンらの文献（M.E.Fermann, M.J.Andrejco, M.L.Stock, Y.Silberberg and A.M.Weiner, *App. Phys. Lett.*, 62, 910(1993)）に開示されている。この非線形性ゆえに、このキャビティのソリトンパルス幅は 2.0  $\text{ps}$  であり、クラウスら（F.Krausz, M.E.Fermann, T.Brabec, P.F.Curley, M.Hofer, C.Spielman, E.Wintner and A.J.Schmidt, *IEEE J. Quantum Elec* 50

tronics

tronics

tronics, 28, 2097(1992)）が発見した観測値によく一致している。スペクトルの（複数の）サイドバンドの位置から、1. 551  $\mu\text{m}$  から 1. 561  $\mu\text{m}$  の波長に対して 7. 8 ~ 4. 0  $\text{ps}^2$  の範囲で GVD（群速度の分散）のファイバー格子内の変動範囲を算出することができる。こうして算出されたところによれば、1. 559 5  $\mu\text{m}$  および 1. 557 0 1  $\mu\text{m}$  の波長において GVD は 4. 1  $\text{ps}^2$  であり、これは（前述のように）波長 1. 558 において別個に測定された GVD の 3. 40  $\text{ps}^2$  の値とよく一致している。両者の値の相違は、出力パルス中の残留チャーブに由来するものと考えられる。ファイバー内の分散の伝搬（プロパゲーション）によるパルスの小さなチャーブは、生じしない。これは、ファイバーの分散の大きさが、格子の分散に比べて二桁ほど小さいからである。むしろ、出力カップリングの偏光器によって拒絶された光線のほうが、パルスに小さなチャーブを誘導している。

【0019】波長によるパルス幅の分散と不連続なチューニング特性とは、前述のように、チャーブ格子の幾つかの小さな不規則性の存在を示唆している。同様に、いくつかの波長では、パルスのスペクトルは非一様で、スペクトルのサイドバンドの位置は、理論（例えばケリーらの文献（S.M.J.Kelly, *Electron Lett.*, 28, 806(1992)）を参照のこと）の予測するところとは異なってサイドバンドの次数の平方根に比例してはいない。これらの非規則性が取り除かれれば、パルススペクトルの一様性と滑らかに連続するチューニング能力とが得られるであろう。

【0020】本システムではファイバーの分散は全く問題にされていないから、本発明の装置は、単に適正なチャーブしたファイバー格子を選ぶだけで、いかなるファイバー利得の材料を用いても等しく適当に機能する。そのうえ、現在のシステムは、単に格子の分散とキャビティの非線形性を計っているだけである。たとえば、得られるパルス幅は、そのシステムのソリトンのパルス幅と同等であるのに、そこで発生したパルスエネルギーは、与えられたソリトンパルス幅に対してキャビティ内で起こりうる最大限の非線形位相遅れから算出することができる。このゆえに、10 nJ を越えるエネルギーのパルスを発生する能力がある受動モード同期ピコ秒ファイバー発振器を構成することが可能なのである。

【0021】本発明のレーザー装置の設計は、実施例の形で説明されており、同様の性能は、いかなる形式のモードロックレーザー装置でも、チャーブ格子を含む分散性の高い遅延線を採用することによって得られる可能性がある。第1反射鏡 20、モード同期機構 23、高分散遅延線 21 および波長チューニングためのセクション 24 を含むモードロックレーザー装置の一般的な設計を、図4に示す。同図では分散遅延線と第2反射鏡 22 とは別個に描かれているが、チャーブ格子 1 を採用した場合

には、これらの二つの機能はまとめられる。そこで、二つのチャーブ格子をそれぞれキャビティの一端に用いる構成も可能である。互いに異なる分散の二つのチャーブ格子を選択することにより、キャビティ内の分散の総量もまた変更可能で、特に、所定の要求出力に対してシステムの性能を最適化するために、正值から負値の全ての範囲にわたって変更できる。

【0022】分けても、本発明によれば、環境変化にも安定しているファイバーレーザー装置を、偏光を維持するファイバーフィルタ内の飽和性吸収体モード同期を利用して構成することができる。ここでは、図5に示すように、ファイバーレーザーキャビティの一端はチャーブファイバーフィルタC1から構成され、同キャビティの他端は飽和性吸収体52を含んでいる。もし、チャーブ格子C1が偏光を維持するファイバに直接書き込まれており、かつ、能動ファイバ10'を含む使用されている全ファイバーが偏光を維持する性質のものであれば、図示のファイバーフィルタモード同期装置12は不要である。さもないと、環境に対する安定性を確保するために、偏光が維持されないファイバーの長さを短く(1m未満に)しなくてはならない。バーネットらの文献(Barnett et al., Opt.Soc.Am.Techn.Deg.Ser., 8,52(1994))に例証されているような従来技術とは対照的に、パルス幅は、もはや飽和性吸収体52の非線形な応答時間によって定められる必要はない。むしろ、発生したパルス幅は、今や主にキャビティの非線形性および分散から定められている。ここで実は、パルスは雑音から起動し安定に維持されることが、飽和性吸収体52により保証されている。こうして、この形式のキャビティ設計は、性能指標にかなりの向上をもたらす。この向上は、大きな分散をもつ遅延線に頼ることなしには、容易に達成することはできないほどのものである。

【0023】別の本発明による環境に安定なキャビティ設計は、モード同期機構として非線形偏光旋回を使用している。ここでは、図6に示すように、ファラデー回転鏡61の採用によりキャビティ内の線形偏光位相ドリフトは取り除かれており、また、一つない二つの波板WPをレーザー・キャビティ内に挿入して、ファイバーレーザーの偏光固有モード間に生じる位相バイアスを導入している。同図で、符号FCはファイバーコリメーター65を指し、キャビティ内の視準および焦点合わせのための複数のレンズの代わりに採用されていると考えてもよい。符号Pは偏光子であって、レーザー装置において出力カップリングと単一偏光状態の選択とのために使用されている。格子の前でのさらなる偏光の制御は、チャーブ格子が非偏光維持ファイバに描かかれている場合にのみ必要である。符号FRMはファラデー回転鏡61であり、符号FRは45°ファラデー回転器62である。符号WPは一つない二つの波板63であって、キャビティ内の偏光の制御に使用されている。エ

ルビウムファイバ10は、レーザー装置に対する安定要求によって、偏光維持性のものでも、低い複屈折性のものでもよい。カップラー66はオプションであって、パルスの起動にあたり飽和性吸収体67にレーザー・キャビティをカップルする手段を与えるものである。

【0024】レーザーフィルタの力学的な振動に対し完全に不感であることが要求されるかどうかによって、レーザーフィルタは偏光維持性であっても、低い複屈折性のものでできてもよい。キャビティの力学的な振動(例えば、ミラーを動かすとか、ファイバに振動を与えるとか)によっても、直接または外部キャビティに通じるカップラー66を通じてキャビティ内に飽和性吸収体67を含ませることによっても、モード同期の起動はできる。

【0025】図5および図6に示すキャビティ設計はいずれも、図5の飽和性吸収体52と強いカップリングがあるのでこの手の設計のチューニング範囲は限定されるにも係わらず、波長チューニング要素による波長チューニングをすることができる。図6のような環境に対して安定なキャビティの設計に、分離している波長チューニング要素70(複屈折フィルターや、チューナブルなファブリ・ペローフィルターなど)を波長チューニング用に提供したものを、図7に示す。同図のレーザー装置では、分離している波長チューニング要素を提供したのに加え、ファイバーフィルタを熱したり引き伸ばしたりして、格子の反射機能それ自身でチューニングすることができる。それだけではなく、ラジオ周波数で作動する音響光学デバイスや電気光学デバイスなどを能動モード同期要素として取り込むことによって、モードロックレーザーを起動することも、外部の電気信号とレーザーのタイミングを合わせることもできる。このようなモードロックレーザー装置については、後ほど図10を参照してさらに詳しく論じることにする。

【0026】本レーザー装置では、二つないしそれ以上の数の波長で同時に動作するように調整することも可能であろう。それには、二つ以上の波長チューニング要素を採用したり、十分に分離した反射特性をもつ複数の格子を使用したりすればよい。本応用例に使用する複数のチャーブ格子は、ある波長のパルスが他の波長のパルスに漏れ出ないように、十分に分離した反射特性を有していなければならない。もし他の波長へのパルスの漏出があると、レーザーの作動に不安定性を生じることにつながるからである。互いに異なる反射特性をもつ複数の格子を使用していると、キャビティ内の所定の位置にこれらの格子を配置することにより、異なる波長のパルス列の反復率を独立に設定することもまた可能になる。レーザーの二波長動作に十分と思われるだけの分離した反射特性をもつ二つの格子C1, C2を備えたキャビティ設計の一例を図8に示す。

【0027】モードロックレーザー装置の性能を最適化

する目的でチャーブプラグ格子を使用することは、非線形偏光旋回がモード同期機構として使われているファイバーレーザーに限られるものではない。本質的に、チャーブプラグ格子を加えることは、いかなるレーザーシステムをも利することができる。特に魅力的であるのはリング・ファイバーレーザーであり、分けてもフィギュア・エイトレーザーと通常呼ばれているダブルリング・ファイバーレーザーである。(フィギュア・エイト(8の字型)レーザー装置についてはノスケ(Noske)らが論じている。)チャーブ・ファイバープラグ格子C1を装備したフィギュア・エイトレーザー装置90の一例を図9に示す。キャビティー内の損失を最小にする目的で、ファイバープラグ格子が偏光分離カッパー92'を介して付加されている。ここで、第1偏光制御器PC1は、偏光分離カッパーの前で線形偏光を発生するように調整される。また、プラグ格子C1からの反射光の偏光は、第2偏光制御器PC2を通して90°旋回している。これにより、可能な範囲で最小限の損失を伴うだけで、光線はファイバーリングに沿って確実に回り続けるようになる。ここで、キャビティーの左側での光線の伝搬方向は、アイソレーター14により確実に時計回りになる。キャビティーの右側にある第3偏光制御器PC3も、モード同期機能を最適化することを目的に備えられている。なお、キャビティー内のどこにでもファイバー・カッパー(図略)を付加装備して、出力カップリングを得ることができる。

【0028】このようなキャビティー設計でも、チャーブ格子を複数個備えることにより、複数の波長での作動ができるようになってよい。このようなシステムを環境に対して安定にするには、ファイバーおよびカッパーのはとんど若しくは全てを偏光維持性(偏光面保存性)にしておくとよい。この場合にモード同期を最適化するには、図9に矢印で示すように、第3偏光制御器PC3の代わりに不可逆線形位相シフター(NLPS:a non-reciprocal linear phase shifter)を使用すると有利である。NLPSは、図9の下部に示すように、一つないし二つの波板91が二つの45°ファラデー旋回器92, 93に挟まれているものであり、この分野では周知のものである。ここで、NLPSは、レーザーキャビティーの右側の逆方向に伝搬するパルスの間に線形位相遅れを生じさせる。

【0029】キャビティー設計の他の変形態様の一つとして、能動モード同期要素101(例えば音響光学変調器や、電気信号源に接続された電気音響光学変調器など)、典型的には電波周波数源103をキャビティー内に装備してもよい。能動モード同期要素は、受動モード同期を立ち上げるために使用することもできる。能動モード同期要素は、光通信で広く使われているように、外部の電気時刻信号に発生したパルスのタイミングを合わせることにも使用することもできる。チャーブプラグ

格子1および能動モード同期要素101を装備したキャビティー設計の一例を図10に示す。

【0030】前述の開示と教示により、当業者には、本発明に対するその他の変形態様や種々の変更ができるることは明らかである。したがって、本書ではごく限られた本発明の実施例しか明確に記述されていないが、本発明の精神や視野を逸脱せずに無数の変形態様が作りだされ得ることは明らかである。

【図面の簡単な説明】

【図1】パルス幅の制御にチャーブ格子を用いたバッシュ・モードロック・ファイバーレーザー装置を示す模式図

【図2】2.7ピコ秒のパルスの性質を示す組図(一次の側波帯のピークは示されておらず、その強度は5.0である)

(a)自己相関を示すグラフ

(b)パルス・スペクトル

【図3】チャーブ格子の反射率(実線)、実験により得られたパルス幅(黒丸)および時間と帯域幅との積(四角)を波長の関数で示したグラフ

【図4】フィードバック用の鏡、利得媒体、波長同期用の波長選択装置、モードロック機構およびパルス幅制御用の分散遅延線(チャーブ格子を含む)を含むモードロックレーザー装置の包括的な設計を示す模式図

【図5】モード同期用の飽和性吸収体を備えた偏光維持ファイバー・レーザーキャビティーの設計を示す模式図

【図6】パルス幅制御用のチャーブ格子を備え、非線形偏光旋回(evolution)によりモード同期している環境に安定なファイバー・レーザー装置を示す模式図

【図7】光フィルターの付加により波長制御用の機能が付与されている図6同様の実施例を示す模式図

【図8】二つの異なる反復率をもつ二つの異なる波長でモード同期を得るためにきれいに分離した反射特性を有する二つのチャーブファイバー格子が組み込まれた二波長ファイバー・レーザー装置を示す模式図。同装置の波長同調要素(チューナー)は光学機器であり、二波長のキャビティー損失が等価になるよう調整することができる。

【図9】レーザーの安定性を増すために一つのチャーブファイバー格子が組み込まれた8の字型レーザー装置を示す模式図。偏光を維持するキャビティー設計の場合には、モード同期を最適化するために、偏光制御器PC3の代わりに不可逆線形位相シフターを使用することができる。

【図10】バッシュ・モードロックを起動するためや、外部電気時計に発生したパルス列を同期させるために、チャーブ・ファイバー格子と音響光学変調器または電気光学変調器とが組み込まれているファイバー・レーザー装置を示す模式図。

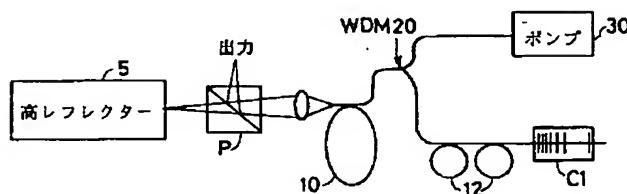
## 【符号の説明】

C1, C2 : チャーブファイバーブラッグ格子 (21, 22を含む)  
 1, 2, 3, 4 : チャーブファイバーグラス 5 : 高レフレクター  
 10 : エルビウム・ファイバー (利得媒体、アクティブ・ファイバー)  
 10' : 偏光維持エルビウム・ファイバー、アクティブ・ファイバー  
 12 : 偏光制御器 (ファイバー・ループ制御器) 10  
 20 : 第1反射鏡 21 : 高分散遅延線 22 : 第2反射鏡  
 23 : モード同期機構 24 : 波長選択手段  
 25 : 出力ファイバー・カップラー 26 : 開放端  
 27 : 出力端  
 30 : ポンプ、主発振器強度増幅器 (MOPA) レーザー・ダイオード  
 5 : 高レフレクター 52 : 鮎和性吸収体

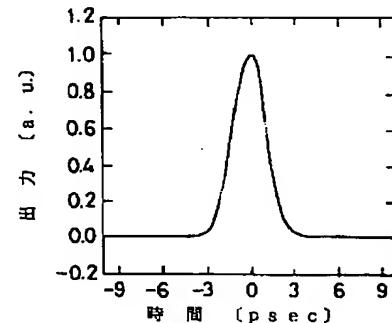
\* 61 : F RM (ファラデー旋光鏡) 62 : F R (ファラデー回転器)  
 63 : WP (波板) 65 : F C (ファイバー・コリメーター=視準器)  
 66 : カップラー 67 : 鮎和性吸収鏡 68 : スライス (接続器)  
 70 : チューナー (波長制御器、同調器)  
 9 : 不可逆線形位相シフター 90 : フィギュア・エイトレーザー装置  
 91 : WP (波板) 92, 93 : F R (45° ファラデー回転器)  
 92' : 偏光分離カップラー 94 : カップラー  
 101 : 变調器 (能動モード同期要素) 103 : R F 源 (電波周波数源)  
 L1, L2 : レンズ P : 偏光子  
 PC1, PC2, PC3 : 第1、第2、第3偏光制御器  
 WDM20 : 波長分離多重カップラー

\*

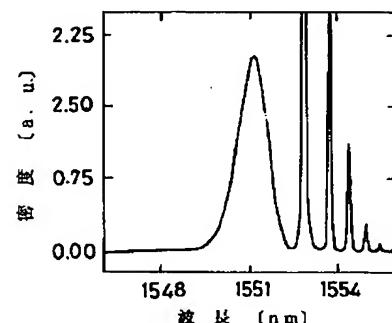
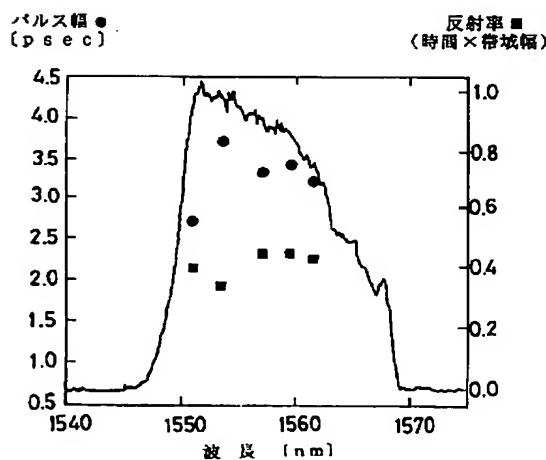
【図1】



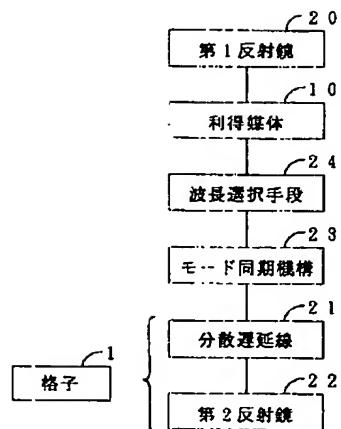
【図2】



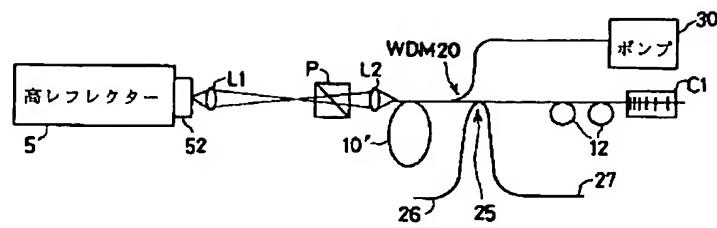
【図3】



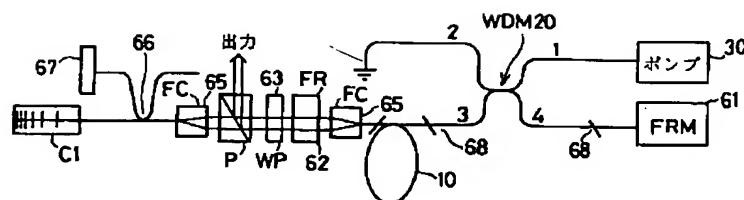
【図4】



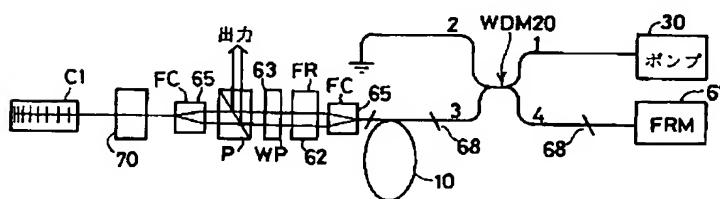
【図5】



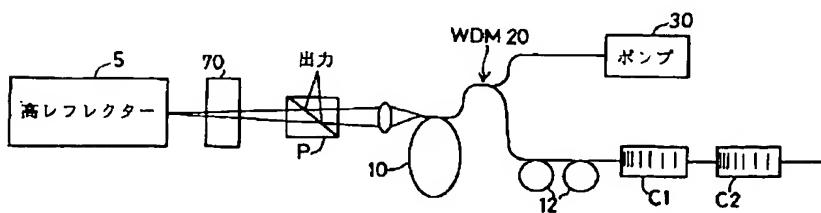
【図6】



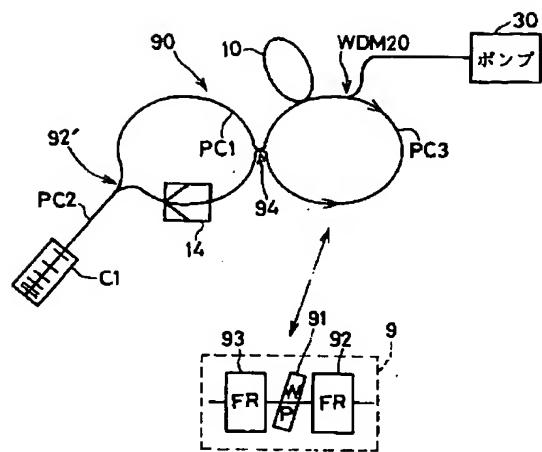
【図7】



【図8】



【図9】



【図10】

